

Institut für Reaktorwerkstoffe
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
des Landes Nordrhein-Westfalen

Aufbau von Bestrahlungskapseln für
Graphit

von

R. Gain

Jül - 94 - RW

Januar 1963

Aufbau von Bestrahlungskapseln für Graphit

I. Bestrahlungen von nichtinstrumentierten Kapseln bei Reaktortemperatur

Von R. Gain Institut für Reaktorwerkstoffe der Kernforschungsanlage Jülich

1. Einleitung

Im Strahlungsfeld eines Reaktors erleiden alle Materialien mehr oder weniger starke Veränderungen ihrer physikalischen, chemischen und technischen Eigenschaften. Vor ihrer Verwendung beim Reaktorbau ist es daher erforderlich, die Art und den Betrag der zu erwartenden Strahlenschädigungen wenigstens annähernd abschätzen zu können.

Diese sind von vielen, z.T. nur schwer kontrollierbaren Faktoren abhängig. Neben den Materialeigenschaften der Probe selbst und ihrer Vorbehandlung spielen Fluß und Bestrahlungsdosis, Bestrahlungstemperatur, chemische Umgebung während der Bestrahlung, Spannungszustand und andere Faktoren eine wichtige Rolle [1].

Die zum Bau im Kern oder nahe am Kern verwendeten Materialien akkumulieren während der Betriebszeit des Reaktors im allgemeinen eine hohe Neutronendosis.

Um bei Bestrahlungsexperimenten eine ähnlich hohe Dosis innerhalb eines erträglichen Zeitraumes zu erhalten, ist es in den meisten Fällen notwendig, die zu untersuchenden Materialien im oder am Kern eines Hochflußreaktors (Materialprüfreaktor, Testreaktor) unterzubringen.

Strahlenschäden (Bildung von Frenkel-Defekten) in Reaktorbaumaterialien werden nur von schnellen Neutronen oberhalb einer für jedes Material charakteristischen Energieschwelle hervorgerufen. Die gegenwärtigen Vorstellungen über den Mechanismus dieser Schädigungen sind an anderen Stellen eingehend beschrieben worden, z. B. [2, 3, 4].

Daher ist bei der Unterbringung von Experimenten dieser Art im Reaktor darauf zu achten, daß in der Bestrahlungsposition der Anteil der schnellen Neutronen besonders hoch ist. D. h., zwischen dem Bestrahlungsexperiment und benachbarten Brennelementen soll sich möglichst wenig Moderator befinden, um das Spaltspektrum der Neutronen gut ausnutzen zu können.

Wegen der Erzeugungsart der Strahlenschädigungen und den bei den üblichen Bestrahlungstemperaturen unvermeidlichen Ausheileffekten ist es ferner nicht ganz gleichgültig, ob eine bestimmte Neutronendosis in einem kürzeren oder längeren Zeitintervall akkumuliert wird. Doch kann man mit Bestimmtheit sagen, daß die in einem längeren Zeitraum angesammelte Gesamtdosis sicher keine größeren Schäden hervorrufen kann als eine Kurzzeitbestrahlung mit der gleichen Gesamtdosis (gleiche Versuchsbedingungen sind dabei vorausgesetzt).

Zu den wichtigsten Reaktorwerkstoffen zählt Graphit, der auch beim Bau von Hochtemperaturreaktoren immer mehr an Bedeutung gewinnt. Graphit ist kein isotropes, einheitliches Material wie etwa ein Metall.

Seine Eigenschaften hängen stark von der Herstellungsweise und den verwendeten Rohstoffen ab. Obwohl bereits viele Arbeiten über das Verhalten von Graphit unter Reaktorbestrahlung vorliegen, können diese Untersuchungen keineswegs als abgeschlossen gelten. Der Mechanismus der Schädigungen ist noch nicht mit genügender Genauigkeit bekannt. Daher lassen sich auch für verschiedene Graphitsorten keine quantitativen Voraussagen über den Umfang

der bei einer Bestrahlung zu erwartenden Schädigung machen.

Während Bestrahlungsergebnisse aus diesem Gebiet laufend veröffentlicht werden, ist bisher wenig über die experimentelle Technik solcher Bestrahlungen bekannt geworden [2, 5, 6].

In dieser Arbeit sollen daher die wichtigsten Gesichtspunkte und Kapselkonstruktionen bei der Bestrahlung von Graphitproben in Hochflußreaktoren besprochen werden. Der erste Teil befaßt sich mit dem Aufbau von einfachen, nichtinstrumentierten Bestrahlungskapseln, bei denen die Temperatur der Proben möglichst nahe der Temperatur des Kühlmittels liegen soll.

Im nachfolgenden zweiten Teil werden komplizierte instrumentierte Kapseln beschrieben, bei denen die Bestrahlungstemperaturen in gewissen Grenzen regelbar sind und bei etwa 400 °C oder 800 °C liegen.

2. Auswahl der Proben und allgemeine Gesichtspunkte für die Konstruktion der Kapseln

Bestrahlungen mit hohen Neutronendosen in Hochflußreaktoren sind sehr kostspielig. Da eine feste Gebühr für das benutzte Einheitsvolumen bezahlt werden muß (z. B. in den USA 55,— bis 65,— Dollar pro inch³ und 10²⁰ thermische Neutronen je cm²), sollten die Proben so klein wie möglich gehalten werden.

Man muß sich also überlegen, an welcher Probengröße die vor und nach der Bestrahlung durchzuführenden Messungen noch mit hinreichender Genauigkeit ausgeführt werden können. Dabei sollten die Meßfehler der einzelnen Größen kleiner sein als die Ungenauigkeit dieser Größen, die durch die Ungenauigkeit in der Messung der Neutronendosis, des Spektrums und der Temperatur hervorgerufen werden:

$$\left| \frac{\Delta G}{G} \right|_{\text{Messung}} < \left| \frac{G(D + \Delta D) - G(D)}{G(D)} \right| + \left| \frac{G(E + \Delta E) - G(E)}{G(E)} \right| + \left| \frac{G(T + \Delta T) - G(T)}{G(T)} \right|. \quad (1)$$

G zu messende Größe,
D Neutronendosis,
E Neutronenenergie,
T Bestrahlungstemperatur.

Die wichtigsten Eigenschaften, die bei Graphit auf ihre Änderung vor und nach der Bestrahlung untersucht werden, sind makroskopische Länge, elektrischer Widerstand, Wärmeleitfähigkeit, Biege- und Druckfestigkeit, Gitterabstand usw. Wir fanden, daß diese Messungen hinreichend genau an Proben mit den Abmessungen 5 · 5 · 45 mm³ durchgeführt werden konnten¹. Es wurde ein quadratischer Querschnitt gewählt, um mehr Proben in einer Kapsel unterbringen zu können und um bessere Bedingungen bei der Abführung der durch γ -Heizung erzeugten Wärme zu erhalten.

Stranggepreßte Graphitkörper sind mit der c-Achse ihrer Kristallite vorzugsweise senkrecht zur Preßrichtung orientiert. In dieser Richtung erfolgt auch unter Bestrahlung das

¹ Vorschlag von G. Spener.

größte makroskopische Wachstum. Bei im Gesenk gepreßten Proben liegt die c-Achse wegen der Blättchenform der Kristalle vorzugsweise parallel zur Preßrichtung.

Das makroskopische Wachstum von Graphitproben in verschiedenen Schnittrichtungen unter Bestrahlung ist aus bereits vorliegenden Untersuchungen größenordnungsmäßig bekannt und beträgt bei Temperaturen unter 100 °C und Dosisbeträgen von 10^{21} cm^{-2} bei Neutronenenergien von mehr als 0,18 MeV bereits mehrere Prozent der Ausgangslänge. Dagegen kann die thermische Ausdehnung bei diesen Temperaturen vernachlässigt werden.

Die Proben müssen daher so in der Kapsel untergebracht werden, daß sie sich während der Bestrahlung nach allen Richtungen ungehindert ausdehnen können. Einklemmte Proben werden unter Spannung bestrahlt und verfälschen die Meßergebnisse. Schlecht oder falsch konstruierte Bestrahlungskapseln können Effekte erscheinen lassen, die in Wirklichkeit gar nicht vorhanden sind. Man sollte daher bei der Auswertung von Bestrahlungsergebnissen den Einfluß der Kapsel sorgfältig berücksichtigen.

Auf der anderen Seite müssen die Proben stets in gutem wärmeleitenden Kontakt mit der Außenwand der Kapsel stehen, um die erzeugte Wärme abführen zu können. Die γ -Heizleistung liegt bei den gebräuchlichsten Hochflußreaktoren je nach der Bestrahlungsposition zwischen 0,5 W/g und 15 W/g. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dichte der bestrahlten Graphitproben müssen daher pro Stäbchen zwischen 0,9 W und 30 W abgeführt werden. Unsere Proben wurden im GETR in Vallecitos bestrahlt. In den meisten Bestrahlungskanälen liegen hier die γ -Heizleistungen zwischen 1 W/g und 10 W/g.

3. Aufbau der Kapseln

Auf Grund der oben angestellten Überlegungen erhielten die Kapseln die in Abb. 1 dargestellte Form [7]. Jeweils vier Proben bilden ein quadratisches Bündel mit 1 cm Kantenlänge und werden durch weiche Blattfedern aus rostfreiem

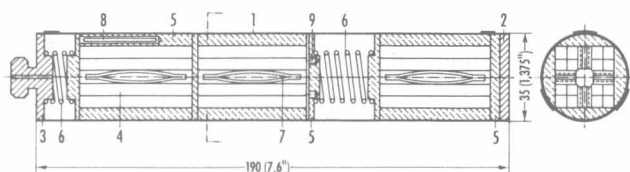


Abb. 1: Nichtinstrumentierte Bestrahlungskapsel für Graphitproben. 1 Hülse aus rostfreiem Stahl; 2 und 3 Bodenstück und Deckel aus rostfreiem Stahl; 4 Graphitproben; 5 Aluminium-Füllstücke; 6 Spiralfeder; 7 Blattfeder; 8 Schwefel-Dosismonitor; 9 Temperaturmonitore

Stahl an Aluminium-Füllstücke angedrückt, die wiederum in engem Kontakt mit der Hülse aus rostfreiem Stahl stehen. Alle Flächen sind fein bearbeitet, um eine gute Passung und damit eine gute Wärmeableitung zu gewährleisten.

In Achsenrichtung der Stäbchen sind leicht gleitende Abschlußplatten verschiebbar, die durch weiche Spiralfedern in ihrer jeweiligen Lage festgehalten werden.

Damit können die Proben während der Bestrahlung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung innerhalb des ausgesparten Raumes ungehindert wachsen und bleiben trotzdem mit der Außenwelt in einem gut wärmeleitenden Kontakt.

Obwohl Stahl unter starker Bestrahlung versprödet und die Härte der Federn mit der Bestrahlung zunimmt, waren die verwendeten Spiral- und Blattfedern selbst bei einer Be-

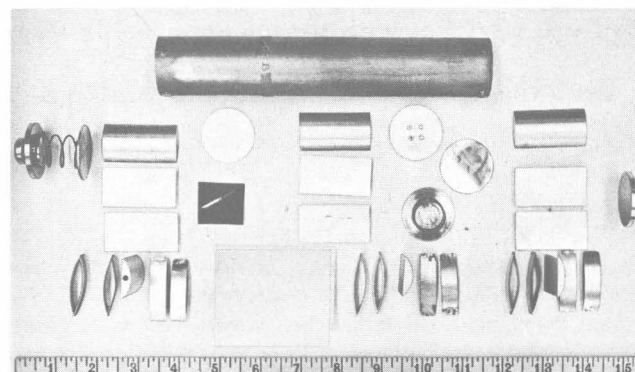


Abb. 2: Einzelteile der Bestrahlungskapsel. Werkfoto, General Electric Co., Vallecitos Atomic Laboratory

strahlungsdosis bis zu $2 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ bei Neutronenenergien von mehr als 0,18 MeV für unsere Zwecke noch brauchbar. Kapseln dieser Art wurden nach dem sorgfältigen Einsetzen der Proben verschweißt und durch die zentrale Bohrung in der Abschlußkappe mit Helium gefüllt. Da die Proben nur durch weiche Federn an ihren Plätzen gehalten werden, sind die Kapseln empfindlich gegen harte Stöße und müssen daher beim Transport und Einsetzen in die Bestrahlungskanäle des Reaktors vorsichtig behandelt werden. Abb. 2 zeigt die Einzelteile einer Bestrahlungskapsel.

4. Temperaturverteilung in der Kapsel

Bei bekannter γ -Heizleistung und Temperatur des Kühlwassers in der benutzten Bestrahlungsposition des Reaktors läßt sich die Temperaturverteilung während der Bestrahlung innerhalb der Kapsel — unter gewissen Vernachlässigungen — näherungsweise berechnen. Voraussetzung ist dabei, daß die entsprechenden Konstanten der verwendeten Materialien ebenfalls mit hinreichender Genauigkeit bekannt sind.

Keine Schwierigkeit bietet die Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Metalle, die für unseren Fall während des ganzen Versuches als annähernd konstant angesehen werden kann. Bei Graphit dagegen ist darauf zu achten, daß sich seine Wärmeleitfähigkeit unter Bestrahlung stark verändert. Sie kann um mehr als eine Größenordnung abnehmen.

Besondere Schwierigkeiten bieten die Übergänge an den Grenzflächen. Die Wärmeübergangszahl hängt hier außer vom Material noch stark von der Bearbeitung der Flächen ab. Ferner muß damit gerechnet werden, daß die ursprünglich gute Paßform zweier aufeinanderliegender Flächen durch Bestrahlungs- und Temperatureffekte verändert wird. Dadurch wird im allgemeinen eine Verminderung der Wärmeleitfähigkeit in dieser Grenzfläche auftreten.

Aus den obigen Bemerkungen ist bereits zu ersehen, daß Angaben über die Genauigkeit einer rechnerisch ermittelten Temperaturverteilung in einer Bestrahlungskapsel sehr schwer zu machen sind. Man sollte sich daher bei den ohnehin teuren Bestrahlungsexperimenten nicht allein auf eine rechnerische Bestimmung der Probestemperatur verlassen. Ist es nicht möglich, Thermoelemente zur kontinuierlichen Überwachung der Temperatur während der Bestrahlung einzusetzen, so sollten wenigstens Temperatur-Indikatoren (s. u.) eingesetzt werden, die ein Eingrenzen der maximal erreichten Bestrahlungstemperatur gestatten.

In den Abb. 3 bis 5 ist der in den Kapseln zu erwartende Temperaturverlauf für γ -Heizleistungen von 1 W/g, 3 W/g und 10 W/g dargestellt. Die angegebenen Dosen beziehen sich auf Neutronenenergien von mehr als 0,18 MeV.

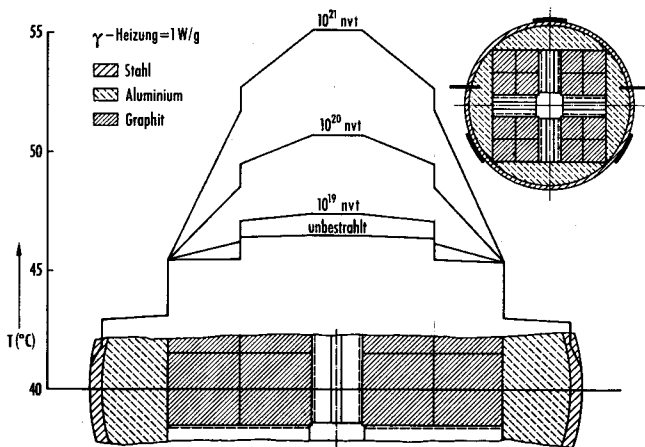


Abb. 3: Temperaturverteilung in der Kapsel bei einer γ -Heizleistung von 1 W/g in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis. nvt bedeutet Neutronen je cm^2

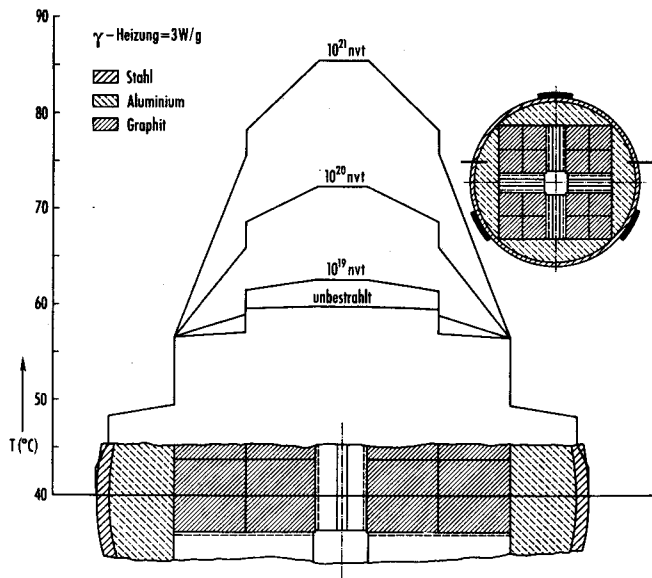


Abb. 4: Temperaturverteilung in der Kapsel bei einer γ -Heizleistung von 3 W/g in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis. nvt bedeutet Neutronen je cm^2

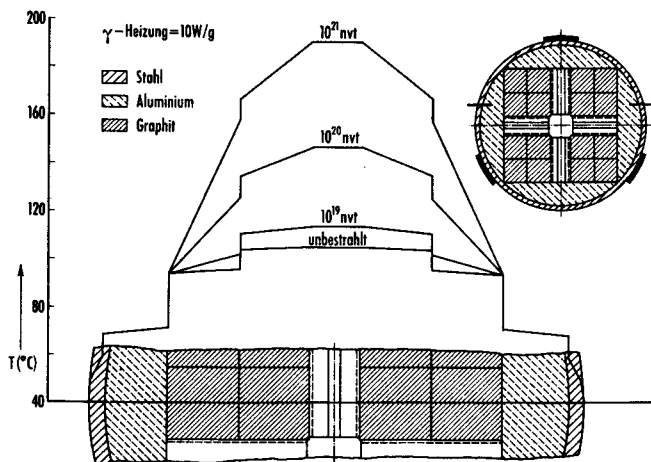


Abb. 5: Temperaturverteilung in der Kapsel bei einer γ -Heizleistung von 10 W/g in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis. nvt bedeutet Neutronen je cm^2

Es wurden bei der Berechnung [8] folgende Materialkonstanten verwendet.

Wärmeleitfähigkeit

Graphit, unbestrahlt $\lambda = 0,4 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ grd}^{-1}$

bestrahlt m. 10^{19} Neutronen je cm^2 $\lambda = 0,08 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ grd}^{-1}$

(w. o., 10^{20}) $\lambda = 0,02 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ grd}^{-1}$

(w. o., 10^{21}) $\lambda = 0,01 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ grd}^{-1}$

Aluminium $\lambda = 0,58 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ grd}^{-1}$

Stahl $\lambda = 0,04 \text{ cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ grd}^{-1}$

Die Wärmeübergangszahlen Graphit — Graphit und Graphit — Aluminium wurden zu $0,46 \text{ W cm}^{-2} \text{ grd}^{-1}$ angenommen. Bei der Berechnung wurde ein Wärmeabfluß in axialer Richtung, eine Veränderung der Wärmeübergangszahl an den Grenzflächen und eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit unter Bestrahlung in den Metallen vernachlässigt. Ebenso wurde der Einfluß der Blattfedern und der Helium-Füllung unberücksichtigt gelassen, und in manchen Fällen wurden die wirklich herrschenden Verhältnisse etwas vereinfacht. Die wegen der Wärmeerzeugung innerhalb der Materialien schwach gekrümmten Temperaturkurven wurden durch Geraden ersetzt. Die so erhaltenen Kurven können keinen Anspruch auf hohe Genauigkeit erheben. Für eine exakte Berechnung ist der geometrische Aufbau der Kapseln zu kompliziert, einige Materialkonstanten sind zu ungenau bekannt.

Die Darstellung gibt jedoch eine gute Abschätzung der zu erwartenden Temperaturen. Vor allem zeigt sie die Temperaturerhöhung mit zunehmender Bestrahlungsdosis, die bei bisherigen Kapselkonstruktionen für Graphit zu wenig berücksichtigt wurde.

Während bei einer γ -Heizleistung von 1 W/g und einer Bestrahlungsdosis von 10^{21} cm^{-2} die maximal erreichte Temperatur etwa bei 55°C liegt, ist dieser Wert bei einer Heizleistung von 3 W/g schon auf etwa 85°C angestiegen. Das ist kaum noch verträglich mit der Bedingung, daß die Probentemperatur während der Bestrahlung so nahe wie möglich an der Temperatur des Kühlwassers liegen sollte. Da jedoch die γ -Heizung an den verschiedenen Stellen im Reaktor annähernd proportional dem Neutronenfluß ist, wird man in Positionen mit einer Heizleistung von 1 W/g und 3 W/g kaum mehr als mit einer Gesamtdosis von $5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ bestrahlen.

Für eine Bestrahlung mit 10^{21} cm^{-2} bei einer Heizleistung von 10 W/g ist jedoch die benutzte Kapselkonstruktion nicht mehr geeignet. Es wird daher der in Abb. 6 dargestellte Kapselquerschnitt vorgeschlagen. Bei dieser Konstruktion wird verhindert, daß die Wärme von einer Graphitprobe

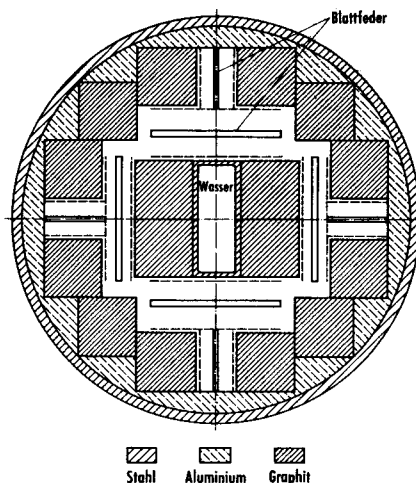


Abb. 6: Querschnitt der verbesserten Bestrahlungskapsel

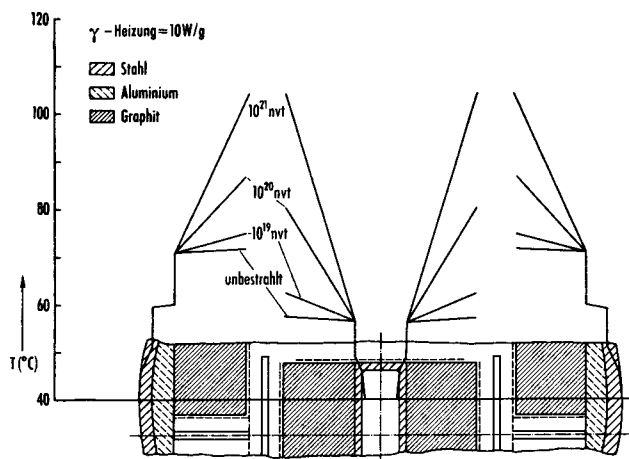


Abb. 7: Temperaturverteilung in der verbesserten Bestrahlungskapsel bei einer γ -Heizleistung von 10 W/g in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis. nvt bedeutet Neutronen je cm^2

erst durch eine andere Probe hindurch abgeleitet wird. Die Kapsel selbst ist noch einmal von einem zentralen Wasserkanal durchzogen. Das wird zweifellos die Konstruktions- und Anfertigungskosten der Kapsel etwas erhöhen. Dieser Betrag sollte aber gegenüber den allgemeinen Bestrahlungskosten kaum ins Gewicht fallen, besonders wenn man berücksichtigt, um wieviel tiefer man dadurch die Bestrahlungstemperatur halten kann.

Die Temperaturverteilung in dieser Kapsel ist in Abb. 7 wiedergegeben. Vergleicht man die Abb. 5 und 7 miteinander, so findet man eine beträchtliche Erniedrigung der früheren Maximaltemperatur von etwa 190°C auf etwa 105°C.

Sehr störend bleibt jedoch weiterhin der steile Temperaturgradient innerhalb einer Probe. Im ungünstigsten Falle beträgt die Temperatur an der heißesten Seite immer noch etwa 100°C, die bis zur kälteren Seite auf etwa 55°C abgesunken ist.

Das bedeutet, daß auf der einen Seite wesentlich mehr Strahlenschäden ausgeheilt werden als auf der anderen. Das Längenwachstum ist auf der heißeren Seite geringer als auf der kälteren, die Proben verbiegen sich daher unter Bestrahlung.

Wir haben diesen sehr deutlichen Effekt besonders bei der in Abb. 1 gezeigten Kapselkonstruktion bei einer γ -Heizleistung von 10 W/g beobachten können. In diesem Falle kann die Temperatur über den Querschnitt einer Probe von etwa 155°C bis auf etwa 90°C abnehmen. In solchen Fällen ist die Auswertung nach der Bestrahlung besonders schwierig. Zur Verminderung dieses unerwünscht hohen Temperaturgefälles in der Probe, das die physikalischen Eigenschaftsänderungen verwischt und vom technischen Standpunkt aus die Probe einer wesentlich härteren Prüfung unterzieht als bei einer Verwendung dieses Baumaterials im Reaktor, bleiben praktisch nur zwei Wege:

Einmal kann man zur Bestrahlung einen Kanal im Reaktor auswählen, der eine geringere γ -Heizleistung aufweist. Das bedeutet aber, daß die Bestrahlungszeit für eine bestimmte Dosis von schnellen Neutronen größenordnungsmäßig um den gleichen Faktor zunehmen würde, um den die γ -Heizleistung abgenommen hat.

Ein anderer Weg besteht darin, die Kapselkonstruktion weiter zu ändern und zur Wärmeableitung ein flüssiges Metall zu benutzen. Schwierigkeiten ergeben sich hier in dem Verlangen nach einem geringen Absorptionskoeffizienten dieses Metalls für thermische Neutronen und seine Verträglichkeit mit Graphit unter Bestrahlung. Ebenso darf dieses flüssige Metall nicht in die Poren des Graphitkörpers eindringen.

5. Temperatur- und Dosisbestimmungen

Die berechneten Temperaturverteilungen tragen die oben erwähnten schwer abschätzbaren Ungenauigkeiten in sich. Es ist daher erforderlich, weitere Temperatur-Indikatoren einzusetzen.

Da in unserem Falle auf Thermoelemente wegen der damit verbundenen erheblich höheren Kosten verzichtet werden mußte, benutzten wir Temperatur-Monitore aus Metall. Aus im Handel erhältlichen Metall-Legierungen mit definierten Schmelzpunkten wurden kleine Pillen gedreht und innen mit einer feinen Bohrung versehen. Mehrere dieser Pillen, deren Schmelzpunkte etwa einen Abstand von 10 grd oder mehr haben, wurden an bestimmten Stellen der Kapsel eingesetzt. Beim späteren Öffnen der Kapseln war an den zugelaufenen zentralen Bohrungen der Pillen leicht festzustellen, welche von ihnen geschmolzen waren. Auf diese Weise läßt sich die während der Bestrahlung maximal erreichte Temperatur an einer bestimmten Stelle der Kapsel leicht eingrenzen.

Es ist jedoch darauf zu achten, daß beim Zusammenbau der Kapsel die Schmelztemperatur der Monitore nicht überschritten wird. Beim Verschweißen muß daher für eine ausreichende Kühlung gesorgt werden.

Die Dosismessungen für Neutronen oberhalb einer Energie von 0,18 MeV bereiten Schwierigkeiten, da in diesem Energiegebiet keine Schwellendetektoren bekannt sind. Es mußte daher auf Schwefel als Monitor zurückgegriffen werden. Bei der Reaktion $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ liegt die in der Literatur zur Auswertung allgemein verwendete Energieschwelle bei etwa 2,9 MeV, also weit höher. Bei hinreichend bekanntem Neutronenspektrum in der benutzten Bestrahlungsposition läßt sich aber die Dosis oberhalb 0,18 MeV ermitteln.

Als Kontrolle dieser Dosismessungen kann die beim GETR für jeden Zyklus und jede Bestrahlungsposition durchgeführte Flußberechnung nach der Drei-Gruppen-Methode dienen. Die oberste Gruppe umfaßt die Neutronenenergien zwischen 0,18 und 10 MeV. Diese Rechnungen werden durch frühere Messungen gestützt.

Um auch einen Vergleich mit den Messungen anderer Autoren zu haben, die in verschiedenen Reaktoren mit anderen, z.T. unbekannten Flußspektren Bestrahlungen durchführten und Dosiswerte nur in MWD/aT² angaben, wurden von uns Proben des aus der Literatur bereits gut bekannten CSF-Graphites mit eingesetzt.

Er dient dabei als Dosismonitor. Aus den bei gleicher Temperatur erhaltenen gleichen Strahlenschädigungen läßt sich dann leicht der Umrechnungsfaktor zwischen den in einem bestimmten Falle angegebenen MWD/aT und unseren Dosen für Neutronenenergien von mehr als 0,18 MeV ermitteln.

Für die tatkräftige Unterstützung dieser Bestrahlungsversuche möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Kersten und dem Bundesministerium für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft danken. Ebenso gilt mein Dank den Angehörigen des Vallecitos Atomic Laboratory der General Electric Co. für die gute Zusammenarbeit und das Eingehen auf alle unsere Wünsche. (Eingegangen am 21. 11. 1961)

Literatur

- [1] Schilling, W.: Kerntechnik 1, 119 (1959)
- [2] Harwood, J. J., H. H. Hausner, J. G. Morse, W. G. Rauch: The Effects of Radiation on Materials, Reinhold Publishing Corporation New York, 1958
- [3] Dienes, G. J., G. H. Vineyard: Radiation Effects in Solids, Interscience Publishers, Inc., New York, 1957
- [4] Genfer Berichte 1958, Bd. 5 und 7
- [5] Pollermann, M., und W. Marth: Kerntechnik 2, 265 (1960)
- [6] Pollermann, M.: Kerntechnik 2, 349 (1960)
- [7] Vertrag IGE-9042 zwischen der KFA Jülich und der International General Electric Co
- [8] Glasstone, S.: Principles of Nuclear Reactor Engineering. Princeton: D. van Nostrand, Inc., 1957

² MWD/aT = megawatt days per adjacent ton
= Megawatt-Tage pro benachbarte Tonne Brennstoff